干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2020.01.12

RDI 指数在新疆 5 个地区干旱监测的应用①

王乃哲[1,2]， 景元书[1,2]， 徐向华[1,2]， Hanggoro Wido[2]
（1 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室，江苏 南京 210044；
2 南京信息工程大学应用气象学院，江苏 南京 210044）

摘 要：为加强新疆地区干旱动态监测与评估，基于阿勒泰、伊宁、乌鲁木齐、和田、哈密 5 个气象站近 49 a 的逐日降水与蒸散数据，采用计算简单、敏感性与稳定性较强的 *RDI* 指数分析了 5 个地区季尺度以及年尺度的干旱特征，并指出了未来新疆地区干旱评估的发展方向。结果表明：(1) 5 个地区在年尺度和 4 个季尺度上的干旱强度与频率略有差异，但干旱程度均有所下降，都存在湿润化趋势，乌鲁木齐湿润化程度最高，和田地区湿润化程度最低。(2) 从季节上看，阿勒泰地区夏、秋两季湿润化程度较高，春、冬两季湿润化程度较低；伊宁和乌鲁木齐两地夏、冬两季湿润化较明显，春、秋两季湿润化程度较低；和田、哈密两地春、夏、秋三季都比冬季湿润化程度高。

关 键 词： 新疆；干旱侦测指数（*RDI*）；干旱；多时间尺度

干旱是在一定的时间尺度上由于自然界可利用水分低于正常水平的区域现象[1]。干旱的基本特征是发生频率高、持续时间长、影响范围广[2]，其发生受到多种复杂的因素影响[3]，降水量的减少是造成干旱最主要的原因[4]。近年来，干旱现象在我国发生越来越频繁，已被认为是我国主要的极端天气事件[5]。新疆位于欧亚大陆腹地，平均海拔约 1 000 m，总面积约 1.66×10^6 km^2，占全国陆地总面积的 1/6[6]。新疆地形复杂，远离海洋，是典型的干旱、半干旱地区，在全球气候变暖的背景下，新疆干旱灾害损失呈现出扩大化的趋势[7]，据统计，1981—1998 年几乎每年都有干旱发生，其中有 9 a 的干旱成灾面积达 6.67×10^4 hm^2 以上[8]；2000—2004 年和 2005—2009 年的粮食损失分别为 1.41×10^6 t 和 2.56×10^6 t，经济作物损失分别达 3.11×10^9 元和 5.19×10^9 元，干旱损失明显增加[9]。

干旱指数是干旱监测和评估的重要组成部分，它简化了许多气候和气候相关参数之间复杂的相互关系[10]。目前常用的气象干旱指数达 55 种之多[11]，如标准化降水指数（*SPI*）、标准化降水蒸发指数（*SPEI*）、帕默尔干旱指数（*PDSI*）、*Z* 指数[12-14]等。科研工作者可以根据干旱强度、持续时间、发生频率和空间范围定量评估气候异常，并且可以对干旱重现概率进行估计，这些信息对规划和设计水资源开发计划等具有重要的参考价值。近年来，干旱指数在新疆地区得到了广泛的应用。江远安等[15]探讨了 *CI* 指数在新疆地区的应用，指出该指数在北疆和南疆干旱监测的准确率分别为 72.1% 和 60.1%；庄晓翠等[16]比较了 *R* 指数、*Z* 指数和 *K* 指数在阿勒泰地区的监测效果；吴友均等[17]以降水温度均一化指标探讨了新疆地区旱涝分布，指出新疆干旱化趋势由东南至西北逐渐减弱，南疆旱涝频率高于北疆；李剑锋等[6]采用 *SPI* 指数对新疆干旱特征变化进行了分析；慈晖等[18]比较了 *EDI* 与 *SPI* 在新疆的干旱监测效果，指出 *EDI* 较 *SPI* 而言更具准确性与合理性；鞠彬等[19]指出 *SPEI* 与 *SPI* 两个指数相结合使用可以提高新疆干旱监测的精准度。TSAKIRIS 等[20]提出的干旱侦测指数（*RDI*）结合降水和潜在蒸散两方面因素对干旱、洪涝进行综合性评估。该指数计算简单，对干旱敏感性较强[21-22]，与农业、水文紧密相连[10,20]，更具有较强的稳定性与实际意义，不依赖于潜在蒸散的计算方法[1,23]，近

① **收稿日期：**2019-04-24； **修订日期：**2019-08-01
基金项目：国家自然科学基金项目（41575111）；江苏省六大人才高峰项目（NY-038）；高校优势学科建设工程项目（PAPD）
作者简介：王乃哲（1993-），男，河北南皮人，硕士研究生，主要从事农业气象研究. E-mail：574144386@qq.com
通讯作者：景元书（1968-），男，江苏镇江人，教授，博士生导师，主要从事农业气象与生态环境研究. E-mail：jingyshu@163.com

年来在干旱、半干旱地区得到广泛认可[24]。因此，本文拟采用干旱侦测指数对新疆5个地区的干旱频率、强度、时间及干湿变化趋势进行评估，为新疆地区干旱监测与评估以及水资源管理等方面提供依据。

1 资料与方法

1.1 数据资料及预处理

研究选取新疆地区5个代表站(北疆:阿勒泰、伊宁、乌鲁木齐;南疆:和田;东疆:哈密)1968年1月~2017年2月的逐日气象数据，数据来源于中国气象数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)。对于缺测数据，采用多年同期平均值进行插补[25]，并通过线性回归的方法校正E601B型蒸发量为小型蒸发量[26]，表1给出了5个代表站的基本特征，同时研究采用气象学对季节的划分标准:3~5月为春季，6~8月为夏季，9~11月为秋季，12~翌年2月为冬季。

1.2 *RDI* 指数计算原理

干旱侦测指数(*RDI*)是2005年TSAKIRIS等[20]提出的，结合降水和蒸散两方面的因素对干旱、洪涝进行综合性评估。*RDI* 总共分为3种形式:初始形式、归一化形式和标准化形式。*RDI* 初始形式($a_k^{(i)}$)和归一化形式(RDI_n)的表达式如下:

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{k} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{k} PET_{ij}} \tag{1}$$

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_k^{(i)}}{\bar{a}_k} - 1 \tag{2}$$

式中:$\bar{a}_k$ 为 $a_k^{(i)}$ 的平均值;k 表示连续的月数;P_{ij} 和 PET_{ij} 分别为第 i 年第 j 月的降水量和潜在蒸散量。相关研究表明采用20 cm口径小型蒸发皿数据替代潜在蒸散项计算的 *RDI* 指数与区域的干旱程度一致性较高[26]，因此这里采用20 cm口径小型蒸发皿数据代替潜在蒸散量。

标准化形式(RDI_{st})为 *RDI* 的第3种表达形式，遵循对数正态分布或伽马分布，伽马分布形式的计算过程可参考文献[27]，本文给出了 RDI_{st} 的对数正态分布形式的表达式:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\sigma_y} \tag{3}$$

式中:$y^{(i)} = \ln(a_0^{(i)})$;$\bar{y}$ 为 $y^{(i)}$ 的算术平均值;σ_y 为 $y^{(i)}$ 的标准差。对于新疆这种降水偏少的地区，在短时间尺度上极易出现降水为零的情况，由于对数正态分布形式的 RDI_{st} 并未考虑降水为零的可能，使其在这种情况下难以计算应用，而伽马分布形式的 RDI_{st} 作为对 *RDI* 指数的一种完善，充分考虑降水为零的情况[27]，因此本研究计算的 RDI_{st} 均由伽马分布形式得到，RDI_{st} 对干旱等级的评估标准见表2[23,27-28];虽然 *RDI* 初始形式与归一化形式并不会受限于降水为零的情况，但TSAKIRIS以及其他学者均未对其建立完善的干旱等级划分标准，实际应用中以伽马分布形式的 RDI_{st} 为主[21-22,28]，因此研究采用 *RDI* 第三种形式中伽马分布形式的 RDI_{st} 对干旱等级进行评估。

表1 新疆地区5个代表站的基本特征

Tab.1 Basic characteristics of five representative stations in Xinjiang

站点	地理位置	海拔/m	年平均降水/mm	年平均潜在蒸散/mm
阿勒泰	47°44′N,88°05′E	735.1	204.5	1 667.7
伊宁	43°57′N,81°20′E	662.5	290.2	1 610.2
乌鲁木齐	43°47′N,87°37′E	917.9	281.5	2 114.5
和田	37°08′N,79°56′E	1 374.6	40.4	2 740.4
哈密	42°49′N,93°31′E	737.2	41.3	2 484.3

2 结果分析

2.1 季尺度干旱特征分析

2.1.1 *春旱* 阿勒泰地区春季干旱发生频率为28.6%，以中度干旱和轻度干旱为主;1974—2000年干旱强度有所增加，1997年干旱强度最强，并且干旱年主要集中在这一时期，2000年之后干旱强度降低;RDI_{st} 指数的气候倾向率最低，为0.05·(10 a)$^{-1}$，

表2 RDI_{st} 干旱等级划分

Tab.2 Drought level of RDI_{st}

	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	正常
RDI_{st}	< -2.0	[-2.0,-1.5)	[-1.5,-1.0)	[-1.0,-0.5)	[-0.5,0.5]

可见阿勒泰地区春季有微弱的湿润化趋势(表 3、4,图 1a)。伊宁地区春季干旱发生频率为 28.6%,以轻度干旱为主;干旱年主要集中在 1970—2000 年,并且极端干旱和重度干旱(严重干旱)都集中在这一时期,2001—2016 年干旱年数明显减少,强度明显降低;RDI_{st}指数的气候倾向率为 0.06·(10 a)$^{-1}$,表明伊宁地区有微弱的湿润化趋势(表 3、4,图 1b)。乌鲁木齐地区春季干旱发生频率最高,为 32.7%,以轻度干旱和中度干旱为主;较为严重的干旱年集中在 1968—1991 年,并且在 1968—1978 年几乎连年干旱,1992—2016 年干旱强度明显降低;RDI_{st}指数气候倾向率较高,为 0.25·(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势较为明显(表 3、4,图 1c)。和田地区春季干旱发生频率与阿勒泰、伊宁地区相同,为 28.6%,以轻度干旱为主;干旱年在 1968—1981 年较为连续,1982—2016 年干旱年连续性较差,1994、1997、2009 年和 2014 年均为较为严重的干旱年;RDI_{st}气候倾向率为 0.09·(10 a)$^{-1}$,有微弱的湿润化趋势(表 3、4,图 1d)。哈密地区春季干旱发生频率最低,为26.5%,以重度干旱和轻度干旱为主;1968—1991 年干旱较为频繁且强度较大,1992—2016 年干旱年数与强度都较低;RDI_{st}指数气候倾向率最高,为0.28·(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势最为明显(表3、4,图 1e)。

表 3　新疆 5 个代表站春季干旱发生频率

Tab. 3　Frequency of spring drought of five stations in Xinjiang

站点	干旱发生频率 / %				合计 / %
	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	
阿勒泰	4.1	2.0	12.2	10.2	28.6
伊宁	6.1	4.1	2.0	16.3	28.6
乌鲁木齐	4.1	4.1	10.2	14.3	32.7
和田	6.1	4.1	6.1	12.2	28.6
哈密	4.1	10.2	4.1	8.2	26.5

表 4　新疆 5 个代表站各时期 RDI_{st}变化趋势率

Tab. 4　Trend rate of RDI_{st} change in each period of five representative stations in Xinjiang

站点	RDI_{st}趋势率 / (10 a)$^{-1}$				
	春季	夏季	秋季	冬季	全年
阿勒泰	0.05	0.19	0.16	0.09	0.28
伊宁	0.06	0.22	0.15	0.24	0.20
乌鲁木齐	0.25	0.35	0.20	0.35	0.42
和田	0.09	0.09	0.11	0.02	0.14
哈密	0.28	0.21	0.20	0.11	0.27

2.1.2　*夏旱*　对于夏季而言,阿勒泰地区夏季干旱发生频率最高,为 34.7%,但干旱强度不大,主要发生轻度干旱;1968—1982年干旱年数较多且干旱强

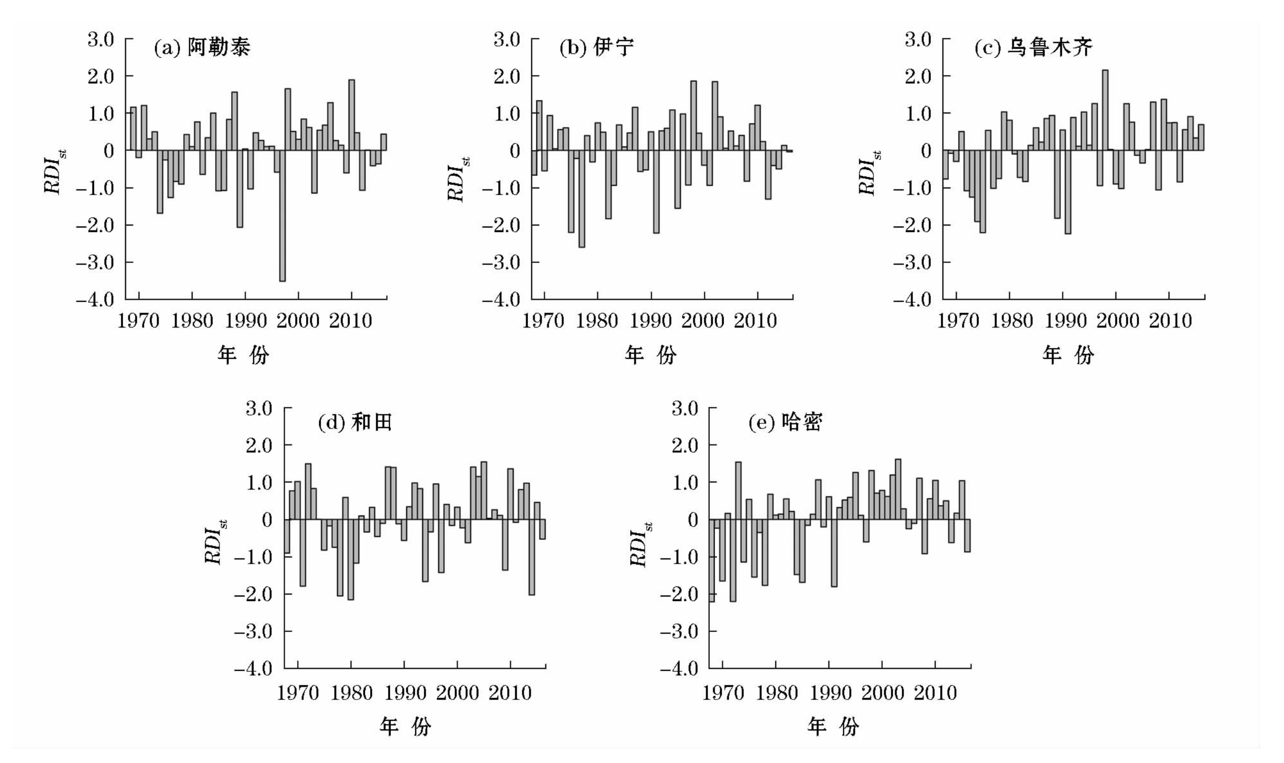


图 1　新疆 5 个代表站春季 RDI_{st}变化特征

Fig. 1　Characteristics of spring RDI_{st} changes of five stations in Xinjiang

度较大,1983—1996 年干旱鲜有发生,1997 年之后干旱频率有所增加且干旱强度稍有提升;RDI_{st} 指数的气候倾向率最低,为 0.19・(10 a)$^{-1}$,可见阿勒泰地区夏季有较明显的湿润化趋势(表 4、5,图 2a)。伊宁地区夏季干旱发生频率最低,为 24.5%,以中度干旱和轻度干旱为主;1968—1984 年干旱年数较多且干旱强度较大,1985—2016 年干旱频率和强度都有所下降,但 1995 年为中度干旱,2008 年为重度干旱;RDI_{st} 指数的气候倾向率为 0.22・(10 a)$^{-1}$,表明伊宁地区有较为明显的湿润化趋势(表 4、5,图 2b)。乌鲁木齐地区夏季干旱发生频率为 30.6%,除极端干旱发生频率较低外,其他各干旱等级发生频率都较高;干旱年主要集中在 1990 年之前,1990—2005 年几乎无旱,2005 之后干旱频率与强度有所提升;RDI_{st} 指数气候倾向率最高,为 0.35・(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势最为明显(表 4、5,图 2c)。和田地区夏季干旱发生频率和伊宁地区相同,为24.5%,重度干旱发生频率较低,其他各干旱等级发生频率相近且都较高,极端干旱发生频率要高于阿勒泰、伊宁和乌鲁木齐地区;总体上 1968—1980 年干旱较为频繁,但干旱强度不高,1981—2006 年干旱年数较少,但 1985 年和 1995 年均为极端干旱年,干旱较为严重,2007—2011年几乎连年干旱;RDI_{st}气候倾向率为 0.09・(10 a)$^{-1}$,有弱的湿润化趋势(表 4、5,图 2d)。哈密地区夏季干旱发生频率为 26.5%,同和田地区类似,重度干旱较低,其他各干旱等级发生频率都较高,且极端干旱频率同和田地区相同,都要高于阿勒泰、伊宁和乌鲁木齐地区;各年代际干旱发生频率相近,1968—1990 年干旱较为严重,1991—2016 年的干旱强度都较弱;RDI_{st}指数气候倾向率最高,为 0.21・(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势较为明显(表 4、5,图 2e)。

表 5 新疆 5 个代表站夏季干旱发生频率

Tab. 5 Frequency of summer drought of five stations in Xinjiang

站点	干旱发生频率 / %				合计 / %
	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	
阿勒泰	2.0	4.1	6.1	22.4	34.7
伊宁	2.0	4.1	10.2	8.2	24.5
乌鲁木齐	2.0	8.2	8.2	12.2	30.6
和田	6.1	2.0	8.2	8.2	24.5
哈密	6.1	0	8.2	12.2	26.5

2.1.3 秋旱 从秋季来看,阿勒泰地区秋季干旱发生频率最低,为 22.4%,各干旱等级发生频率相近,其中中度干旱发生频率最高,轻度干旱次之;干旱强度呈现下降趋势,干旱年主要集中在 1970—1990 年,

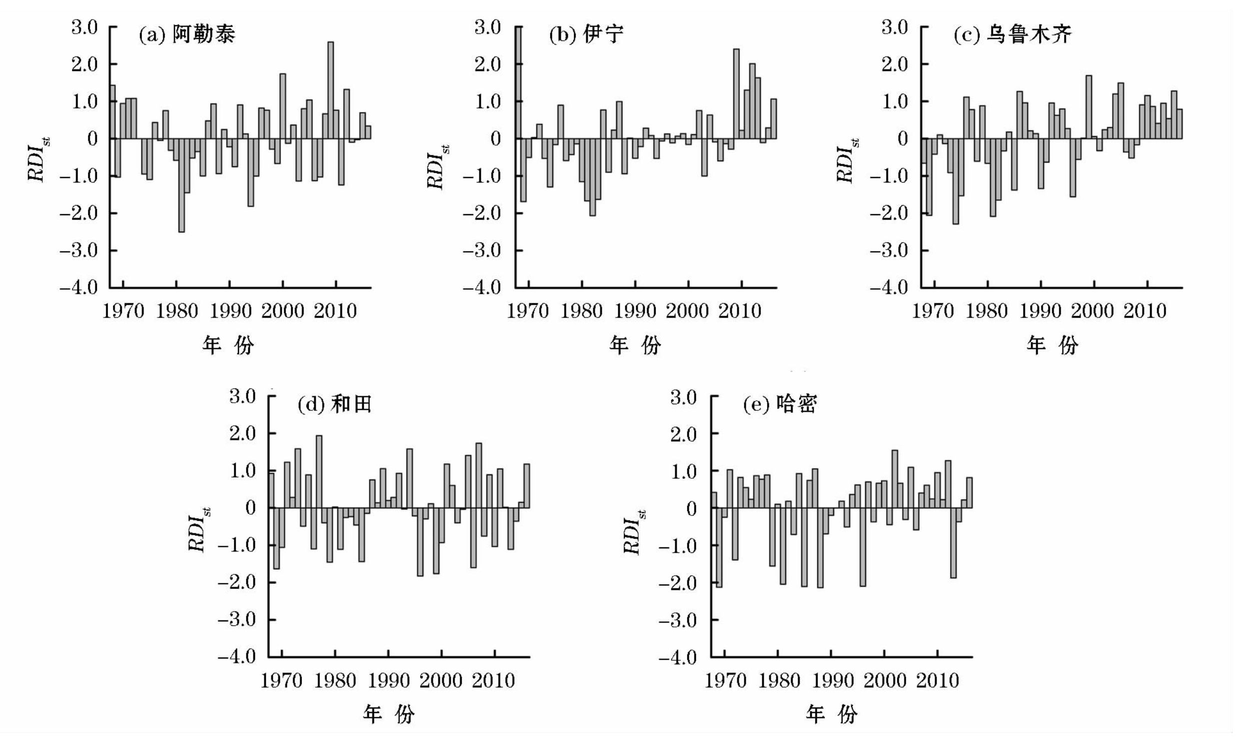


图 2 新疆 5 个代表站夏季 RDI_{st} 变化特征

Fig. 2 Characteristics of summer RDI_{st} changes of five stations in Xinjiang

且干旱强度在这一时期较强，1990 年之后的干旱年数明显减少，强度也明显减小；RDI_{st} 指数的气候倾向率为 0.16·(10 a)$^{-1}$，可见阿勒泰地区秋季有湿润化趋势（表 4、6，图 3a）。伊宁地区秋季干旱发生频率为 26.5%，以轻度干旱发生频率最高，其他各干旱等级频率相近且都较高；1968—1980 年和 2005—2016 年干旱年数较多，1981—2004 年干旱年数较少，但 1991 年和 1997 年为严重的干旱年；RDI_{st} 指数的气候倾向率为 0.15·(10 a)$^{-1}$，表明伊宁地区有湿润化趋势（表 4、6，图 3b）。乌鲁木齐地区秋季干旱发生频率为 34.7%，以轻度干旱为主；干旱年主要集中在 1980 年之前和 1990—2010 年，1980 年之前出现连续几年持续干旱现象，1980s 和 2010 年之后干旱鲜有发生；RDI_{st} 指数气候倾向率最高，为 0.20·(10 a)$^{-1}$，湿润化趋势最为明显（表 4、6，图 3c）。和田地区秋季干旱发生频率最高，为 42.9%，但强度较低，以中度干旱和轻度干旱为主，极端干旱发生频率较其他 4 个地区而言最低；各时期干旱频率较为均匀，其中 1980s 干旱频率最小；RDI_{st} 气候倾向率最低，为 0.11·(10 a)$^{-1}$，但同样有湿润化趋势（表 4、6，图 3d）。哈密地区秋季干旱发生频率为 24.5%，以轻度干旱为主；1980 年之前出现连续几年持续干旱，干旱现象在这一时期尤为突出，1980 年之后干旱年数明显减少，但 1991 年为极端干旱年，随后出现的干旱现象强度明显降低；RDI_{st} 指数气候倾向率和乌鲁木齐相同，为 0.20·(10 a)$^{-1}$，湿润化趋势最为明显（表 4、6，图 3e）。

表 6　新疆 5 个代表站秋季干旱发生频率

Tab. 6　Frequency of autumn drought of five stations in Xinjiang

站点	干旱发生频率 / %				合计 / %
	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	
阿勒泰	4.1	4.1	8.2	6.1	22.4
伊宁	4.1	6.1	6.1	10.2	26.5
乌鲁木齐	4.1	4.1	6.1	20.4	34.7
和田	0	2.0	18.4	22.4	42.9
哈密	4.1	2.0	4.1	14.3	24.5

2.1.4　冬旱　对于冬季，阿勒泰地区冬季干旱发生频率最高，为 34.7%，但干旱强度不大，以中度干旱和轻度干旱为主；各年代际干旱频率较为一致，其中 1970s 和 2010 年之后干旱年数较少；RDI_{st} 指数的气候倾向率最低，为 0.09·(10 a)$^{-1}$，可见阿勒泰地区冬季有微弱的湿润化趋势（表 4、7，图 4a）。伊宁地区冬季干旱发生频率为 30.6%，以轻度干旱为主；干旱年主要集中在 1990 年之前，1990 年之后干旱少有发生且干旱强度明显降低；RDI_{st} 指数的气候

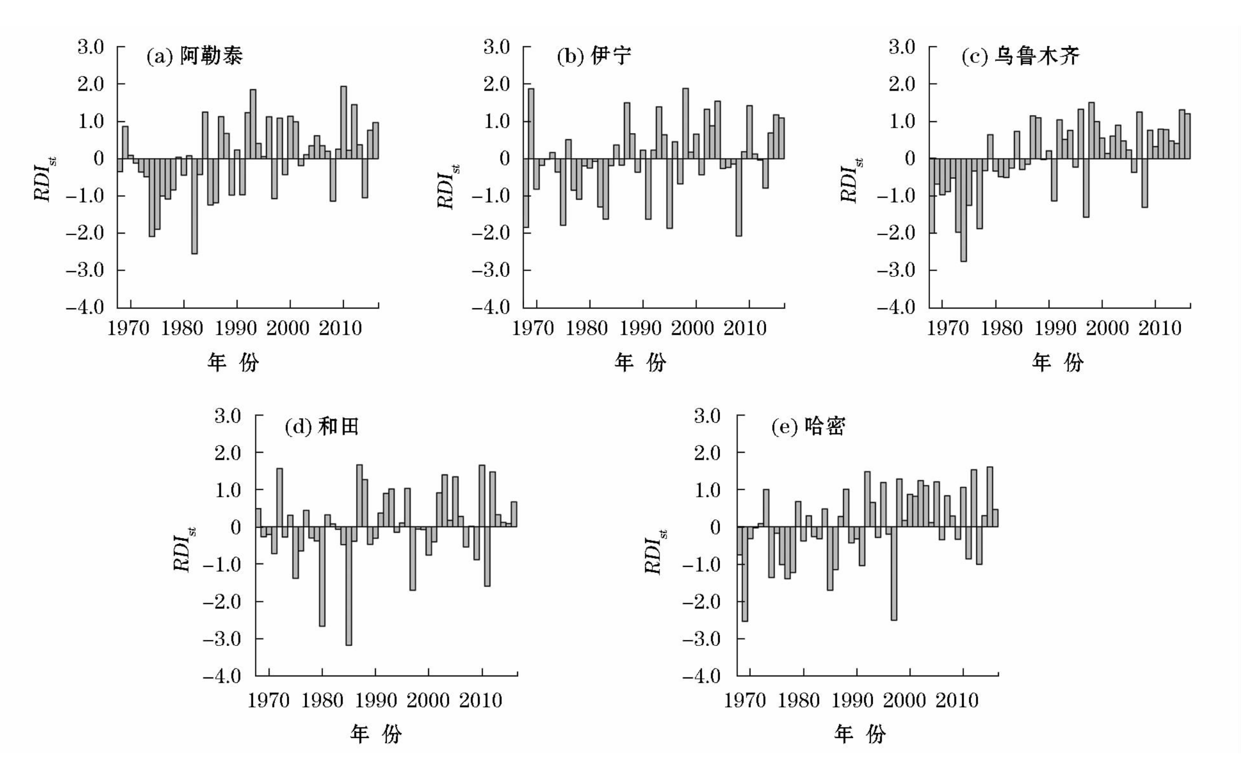


图 3　新疆 5 个代表站秋季 RDI_{st} 变化特征

Fig. 3　Characteristics of autumn RDI_{st} changes of five stations in Xinjiang

倾向率为0.24·(10·a)$^{-1}$,表明伊宁地区有较为明显的湿润化趋势(表4、7,图4b)。乌鲁木齐地区冬季干旱发生频率为30.6%,以轻度干旱为主;干旱年多集中在2000年之前,2000年之后干旱鲜有发生;RDI_{st}指数气候倾向率最高,为0.35·(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势最为明显(表4、7,图4c)。和田地区冬季干旱发生频率为26.5%,以重度干旱和中度干旱为主,极端干旱发生频率最低;干旱年多集中在1986年之前和1995年之后,干旱强度较为相似,1986—1995年无旱;RDI_{st}气候倾向率为0.02·(10 a)$^{-1}$,湿润化趋势最不明显(表4、7,图4d)。哈密地区冬季干旱发生频率最低,为24.5%,但干旱强度较强,以极端干旱和轻度干旱为主,极端干旱发生频率明显高于其他4个地区;在1980s和1970年前后,干旱年较为集中且干旱强度较大,以极端干旱为主,1990年之后干旱年数减少,但1996年和2013年为较为严重的干旱年;RDI_{st}指数气候倾向率为0.11·(10 a)$^{-1}$,有湿润化趋势(表4、7,图4e)。

表7 新疆5个代表站冬季干旱发生频率

Tab.7 Frequency of winter drought of five stations in Xinjiang

站点	干旱发生频率/%				合计/%
	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	
阿勒泰	2.0	2.0	16.3	14.3	34.7
伊宁	2.0	6.1	6.1	16.3	30.6
乌鲁木齐	6.1	6.1	4.1	14.3	30.6
和田	0	8.2	14.3	4.1	26.5
哈密	10.2	4.1	2.0	8.2	24.5

2.2 年尺度干旱特征分析

从年尺度上讲,阿勒泰地区年际干旱发生频率最高,为26.5%,以中度干旱与轻度干旱为主;干旱时间主要集中在2000年之前,其中1970—1990年干旱年较多且干旱强度较大,2000年之后干旱年数明显减少,并且干旱强度也有所下降;RDI_{st}指数的气候倾向率为0.28·(10 a)$^{-1}$,可见阿勒泰地区年尺度上有较为明显的湿润化的趋势(表4、8,图5a)。伊宁地区年际干旱发生频率为24.5%,以重度干旱和轻度干旱为主,相比于其他地区而言,极端干旱发生频率最低;干旱年在2000年之前较为集中,2000年之后干旱年数明显减少,但2008年为极端干旱年;RDI_{st}指数的气候倾向率为0.20·(10 a)$^{-1}$,表明伊宁地区有湿润化的趋势(表4、8,图5b)。乌鲁木齐地区年际干旱发生频率同阿勒泰地区相同,均为26.5%,其中轻度干旱发生频率最高极端,干旱、重度干旱及中度干旱发生频率相近且都较高;干

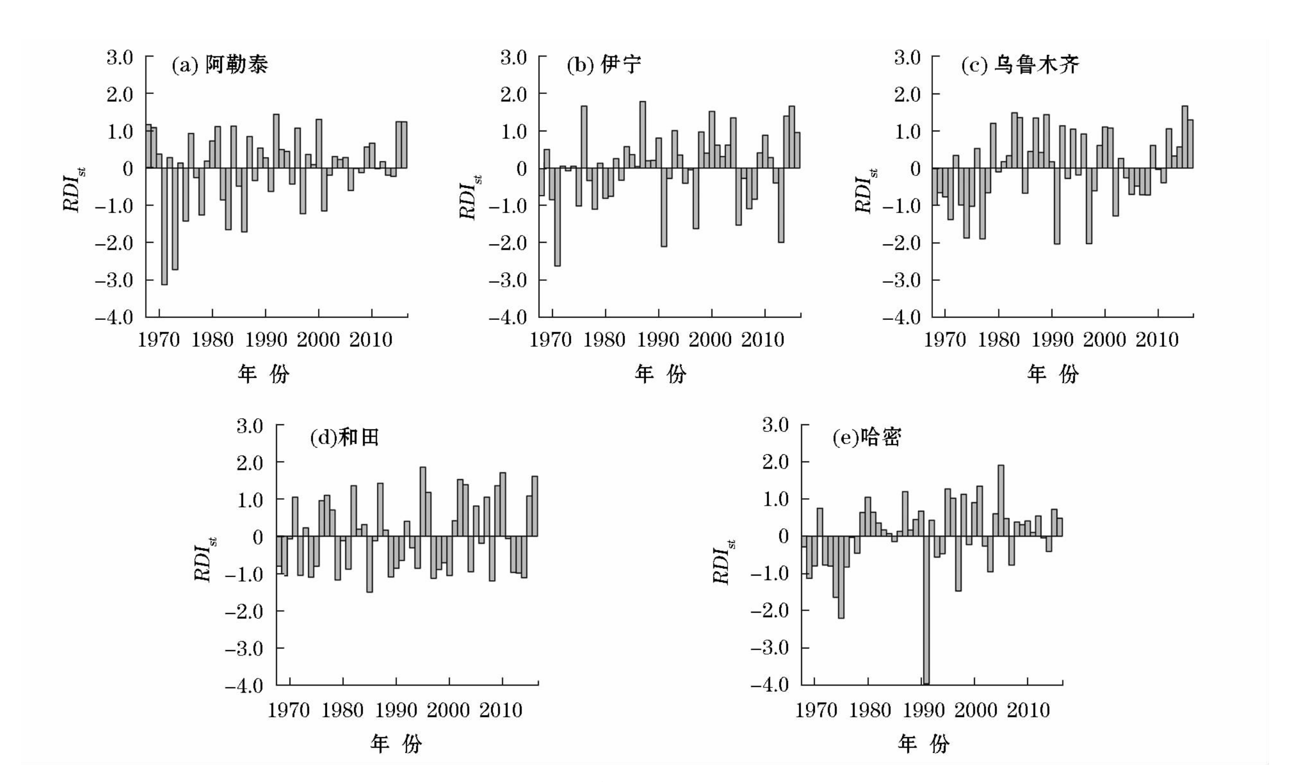


图4 新疆5个代表站冬季RDI_{st}变化特征

Fig.4 Characteristics of winter RDI_{st} changes of five stations in Xinjiang

旱年主要集中在 2000 年之前,其中 1968—1980 年干旱年较为连续且干旱强度较大,2000 年之后干旱年数较少,但 2008 年为重度干旱年;RDI_{st} 指数气候倾向率最高,为 0.42 · (10 a)$^{-1}$,相比于其他 4 个地区而言,湿润化趋势最为明显(表 4、8,图 5c)。和田地区干旱发生频率最低,为 20.4%,以轻度干旱为主;1968—1989 年和田地区干旱强度是有增强的趋势,1990s 干旱发生频率较低,2000—2016 年干旱年数有所增加,相比于其他地区而言,这一时期干旱年数最高;RDI_{st} 气候倾向率最低,为 0.14 · (10 a)$^{-1}$,但同样有湿润化趋势(表 4、8,图 5d)。哈密地区干旱发生频率为 24.5%,以中度干旱为主;干旱年在 2000 年之前较为集中且干旱强度较大,2000 年之后干旱鲜有发生且强度明显降低;RDI_{st} 指数气候倾向率为 0.27 · (10 a)$^{-1}$,有较为明显的湿润化趋势(表 4、8,图 5e)。

表 8　新疆 5 个代表站年尺度干旱发生频率

Tab. 8　Frequency of drought on the annual scale of five stations in Xinjiang

站点	干旱发生频率 / %				合计 / %
	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	
阿勒泰	4.1	2.0	12.2	8.2	26.5
伊宁	2.0	10.2	4.1	8.2	24.5
乌鲁木齐	4.1	6.1	6.1	10.2	26.5
和田	4.1	4.1	2.0	10.2	20.4
哈密	4.1	2.0	14.3	4.1	24.5

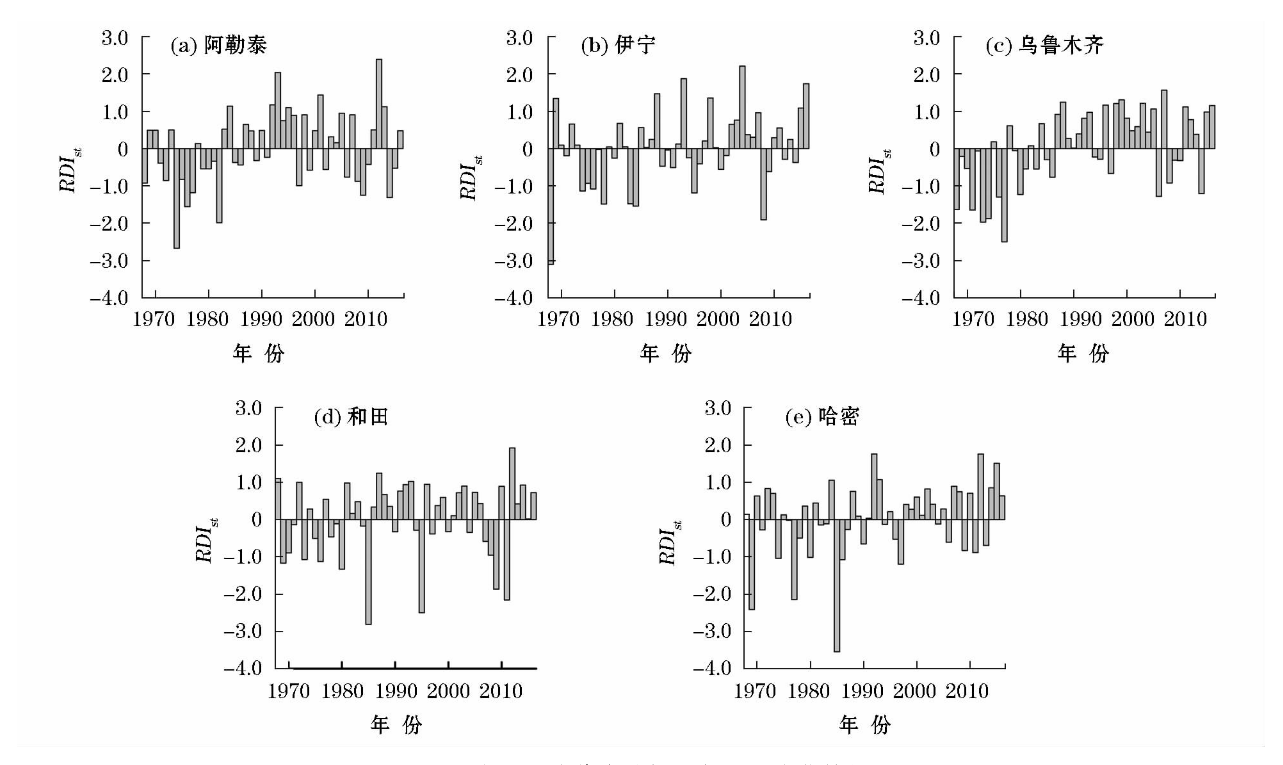


图 5　新疆 5 个代表站年尺度 RDI_{st} 变化特征

Fig. 5　Characteristics of annual RDI_{st} changes of five stations in Xinjiang

3　结 论

本文选取新疆地区阿勒泰、伊宁、乌鲁木齐、和田、哈密 5 个代表站,采用 *RDI* 指数对 5 个地区的季尺度和年尺度干旱特征进行分析,得出的主要结论如下:

(1) 5 个地区在年尺度和四个季尺度上的干旱强度与频率略有差异,但都有湿润化趋势,乌鲁木齐湿润化程度最高,和田地区湿润化程度最低。

(2) 从季节上看,阿勒泰地区夏、秋两季湿润化程度较高,春、冬两季湿润化程度较低;伊宁和乌鲁木齐两地都是夏、冬两季湿润化较明显,春、秋两季湿润化程度较低;和田、哈密两地春、夏、秋三季都比冬季湿润化程度高。

(3) 干旱侦测指数 *RDI* 充分考虑降水与蒸散两个因子对干旱进行评估,相比于仅考虑降水的干旱指数而言更具合理性,而且数据易于获取,计算简单,是一种值得推广的干旱指数。本文对新疆 5 个

地区干旱趋势的研究与谢培等[29]采用其它干旱指数对新疆地区整体干湿趋势的研究结论基本一致，说明 *RDI* 指数可以较为准确地反映新疆地区的干湿变化，有较高的可信度。

目前，对新疆干旱的研究主要集中在监测方面，而干旱的预测方面少有研究。新疆地形复杂，降水偏少且分布极不均匀（北疆大部分地区的年降水量只有 200 mm 左右，南疆与东疆的年降水量相似，均不足 100 mm），南北疆气候差异显著[9]，再加上干旱本身复杂性的特点，干旱的预测成为了难点。在今后的研究中会重点探讨在新疆地区干旱预测模型的选取与优化，及时为水资源系统的规划和管理提供相应的参考信息，以期达到减少干旱损失的目的。

参考文献(References)

[1] VANGELIS H, TIGKAS D, TSAKIRIS G. The effect of PET method on reconnaissance drought index (*RDI*) calculation[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 88(1): 130 – 140.

[2] 沙莉，李施，沙莎，等. 基于 *SPI* 指数甘肃省河东地区干旱特征分析[J]. 气象与环境学报，2016，32(5)：122 – 130. [SHA Li, LI Shi, SHA Sha, et al. Analysis of drought characteristics in Hedong area of Gansu Province based on *SPI* index[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(5): 122 – 130.]

[3] OH S B, BYUN H R, KIM D W. Spatiotemporal characteristics of regional drought occurrence in East Asia[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2014, 117(1 – 2): 89 – 101.

[4] 翟盘茂，邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展，2005，1(1)：16 – 18. [ZHAI Panmao, ZOU Xukai. Changes of temperature and precipitation in China from 1951 to 2003 and its impact on drought[J]. Advances in Climate Change, 2005, 1(1): 16 – 18.]

[5] HOU L, HUANG J, WANG J. Early warning information, farmers' perceptions of, and adaptations to drought in China[J]. Climatic Change, 2017, 141(2): 197 – 212.

[6] 李剑锋，张强，陈晓宏，等. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变[J]. 应用气象学报，2012，23(3)：322 – 330. [LI Jianfeng, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. The evolution of drought characteristics in Xinjiang based on standard precipitation index[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2012, 23(3): 322 – 330.]

[7] 轩俊伟，郑江华，刘志辉. 基于 *SPEI* 的新疆干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究，2016，33(2)：338 – 344. [XUAN Junwei, ZHENG Jianghua, LIU Zhihui. Spatial and temporal variation characteristics of Xinjiang based on *SPEI*[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 338 – 344.]

[8] 姚宇飞，木巴拉克，周国良. 浅论新疆干旱农业区的特点[J]. 新疆农业科学，2001，38(2)：102 – 104. [YAO Yufei, MU Barak, ZHOU Guoliang. Discussion on the characteristics of Xinjiang arid agricultural region[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2001, 38(2): 102 – 104.]

[9] 白云岗，木沙・如孜，雷晓云，等. 新疆干旱灾害的特征及其影响因素分析[J]. 人民黄河，2012，34(7)：61 – 63. [BAI Yungang, RUZI Musha, LEI Xiaoyun, et al. Characteristics of drought disasters in Xinjiang and their influencing factors[J]. Yellow River, 2012, 34(7): 61 – 63.]

[10] TSAKIRIS G, PANGALOU D, VANGELIS H. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (*RDI*)[J]. Water Resources Management, 2007, 21(5): 821 – 833.

[11] 李忆平，李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象，2017，35(5)：709 – 723. [LI Yiping, LI Yaohui. Advances in the adaptability of meteorological drought index in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709 – 723.]

[12] MAVROMATIS T. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(7): 911 – 924.

[13] 王东，张勃，安美玲，等. 基于 *SPEI* 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报，2014，29(6)：1003 – 1016. [WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in southwestern China based on *SPEI*[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003 – 1016.]

[14] 袁文平，周广胜. 标准化降水指数与 *Z* 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报，2004，28(4)：523 – 529. [YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Comparative analysis of the application of standardized precipitation index and *Z*-index in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 523 – 529.]

[15] 江远安，赵逸舟，陈颖，等. 干旱指数 *CI* 的确定及其在新疆的应用[J]. 沙漠与绿洲气象，2010，4(2)：18 – 20. [JIANG Yuanan, ZHAO Yizhou, CHEN Ying, et al. Determination of drought index *CI* and its application in Xinjiang[J]. Journal of Desert and Oasis, 2010, 4(2): 18 – 20.]

[16] 庄晓翠，杨森，赵正波，等. 干旱指标及其在新疆阿勒泰地区干旱监测分析中的应用[J]. 灾害学，2010，25(3)：81 – 85. [ZHUANG Xiaocui, YANG Sen, ZHAO Zhengbo, et al. Drought index and its application in drought monitoring analysis in Altay region, Xinjiang[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(3): 81 – 85.]

[17] 吴友均，师庆东，常顺利. 1961—2008 年新疆地区旱涝时空分布特征[J]. 高原气象，2011，30(2)：391 – 396. [WU Youjun, SHI Qingdong, CHANG Shunli. The temporal and spatial distribution characteristics of drought and flood in Xinjiang region from 1961 to 2008[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 391 – 396.]

[18] 慈晖，张强，白云岗，等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护，2015，31(2)：7 – 14. [CI Hui, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 7 – 14.]

[19] 鞠彬，曾明，徐国梁. 不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报，2017，28(2)：237 – 243. [JU Bin, ZENG Ming, XU Guoliang. Application of different drought indices in drought assessment in Habahe area of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(2): 237 – 243.]

[20] TSAKIRIS G, VANGELIS H. Establishing a drought index incorpo-

rating evapotranspiration[J]. European Water,2005,9 - 10:1 - 9.
[21] KHALILI D,FARNOUD T,JAMSHIDI H,et al. Comparability analyses of the *SPI* and *RDI* meteorological drought indices in different climatic zones[J]. Water Resources Management,2011,25(6):1737 - 1757.
[22] ZARCH M A A,MOBIN M H,DASTORANI M T,et al. Drought monitoring by reconnaissance drought index (*RDI*) in Iran[J]. Water Resources Management,2011,25(13):3485 - 3504.
[23] 周丹,张勃,沈彦俊. 潜在蒸散量估算方法对干旱侦测指数计算的影响[J]. 中国农业气象,2014,35(3):258 - 267. [ZHOU Dan,ZHANG Bo,SHEN Yanjun. Influence of potential evapotranspiration estimation method on calculation of reconnaissance drought index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(3):258 - 267.]
[24] KOUSARI M R,DASTORANI M T,NIAZI Y,et al. Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of reconnaissance drought index and application of non-parametrical statistical method[J]. Water Resources Management,2014,28(7):1857 - 1872.
[25] ZHANG Q,SINGH V P,LI J,et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2011,116(23):113 - 122.
[26] 程清平,王平. 基于 *RDI* 指数的云南 1960—2013 年旱涝变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(1):185 - 196. [CHENG Qingping,WANG Ping. Analysis of drought and flood variation characteristics in Yunnan from 1960 to 2013 based on *RDI* index[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):185 - 196.]
[27] TSAKIRIS G,NALBANTIS I,PANGALOU D,et al. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (*RDI*)[J]. Options Méditerranéennes Série A Séminaires Méditerranéens,2008,(80):56 - 62.
[28] TIGKAS D,TSAKIRIS G. Early estimation of drought impacts on rainfed wheat yield in mediterranean climate[J]. Environmental Processes,2015,2(1):97 - 114.
[29] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等. 1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(2):332 - 339. [XIE Pei,GU Yanling,ZHANG Yuhu,et al. Characteristics of precipitation and drought in Xinjiang from 1961 to 2015[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):332 - 339.]

Application of *RDI* index in drought monitoring of five regions in Xinjiang

WANG Nai-zhe[1,2], JING Yuan-shu[1,2], XU Xiang-hua[1,2], HANGGORO Wido[2]

(1 *Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecasting Warning and Assessment/Key Laboratory of Agricultural Meteorology in Jiangsu*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*; 2 *College of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Drought is a regional phenomenon in which the available water is below normal level on a certain time scale. The basic characteristics of drought are high frequency, long duration, and wide range of influence. Xinjiang is a typical arid and semi-arid region of China. Under the background of global warming, the loss of drought disasters in Xinjiang has shown a trend of expansion. In order to strengthen drought monitoring and assessment in Xinjiang, the *RDI* index was used to analyze the drought characteristics on seasonal scale and annual scale based on the daily precipitation and evapotranspiration data of five meteorological stations in Altay, Yining, Urumqi, Hetian and Hami Prefectures in Xinjiang. The *RDI* index is simple to calculate, sensitive to drought, and has strong stability. The paper analyzed the intensity, frequency, time and trend of drought in the five regions. Finally the direction of drought assessment in Xinjiang was pointed out which should be developed to forecast in order to reduce the loss of drought in Xinjiang. The results showed that the drought intensity and frequency of the five regions on the annual scale and the four seasonal scales were slightly different, but there were different degrees of humidification. Urumqi City had the highest degree of humidification and Hetian Prefecture had the lowest degree of humidification. From the seasonal point of view, the degree of humidification in the summer and autumn in Altay region was higher, but lower in spring and winter. The humidification in both Yining and Urumqi was more obvious in summer and winter but lower in spring and autumn. The humidification in spring, summer and autumn seasons in Hetian and Hami were higher than that in winter.

Key words: Xinjiang; reconnaissance drought index(*RDI*); drought; different time scales